

JP0150295

JAERI-Data/Code
2001-001



JCO臨界事故の投入反応度推定のための
バイアス評価

2001年2月

山本 俊弘・中村 剛実・三好 慶典

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

JCO 臨界事故の投入反応度推定のためのバイアス評価

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部
山本 俊弘・中村 剛実・三好 慶典

(2001 年 1 月 5 日受理)

JCO 臨界事故における投入反応度を臨界計算から推定するために、臨界計算手法のバイアス評価を行った。臨界計算には MCNP 4B を使用し、断面積ライブラリーとしてはポイントワイズの JENDL-3.1, JENDL-3.2, ENDF/B-VI を用いた。これらを用いて濃縮度 10wt.% の溶液ウランを用いた STACY の臨界実験解析と、Rocky Flats Plant で行われた濃縮度 93.2wt.% の臨界実験の解析を行つた。その結果、JCO の溶液燃料の濃縮度 18.8wt.% に対して JENDL-3.1, JENDL-3.2, ENDF/B-VI を用いた場合の実効増倍率のバイアス値はそれぞれ 0.0%, +1.2%, +0.1% となった。

Evaluation of Biases for Inserted Reactivity Estimation of JCO Criticality Accident

Toshihiro YAMAMOTO, Takemi NAKAMURA and Yoshinori MIYOSHI

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 2001)

Biases in criticality calculation methods used in JCO criticality accident analyses were estimated to make accurate predictions of an inserted reactivity in the accident. MCNP 4B and pointwise cross section libraries based on JENDL-3.1, JENDL-3.2 and ENDF/B-VI were used for the criticality calculations. With these calculation methods, neutron effective multiplication factors were obtained for STACY critical experiments, which used 10wt.% enriched aqueous uranium solutions, and for critical experiments performed at the Rocky Flats Plant, which used 93.2 wt.% enriched aqueous uranium solutions. As a result, biases in k_{eff} 's for 18.8wt.% enriched uranium solution of the JCO accident were estimated to be 0.0%, +1.2%, and 0.1% when using JENDL-3.1, JENDL-3.2 and ENDF/B-VI, respectively.

Keywords: JCO Criticality Accident, Criticality Calculation, Neutron Effective Multiplication Factor, Enriched Uranium, Benchmark, STACY,

目 次

1. 序.....	1
2. 計算方法および計算条件.....	1
2. 1 JCO 臨界事故解析.....	1
2. 2 STACY 臨界実験解析.....	2
2. 3 高濃縮ウランの臨界実験の解析.....	4
3. JCO 臨界事故解析のためのバイアス決定.....	5
4. 結論.....	6
参考文献.....	6
付録 A 入力データ.....	16
付録 B 材料データ.....	20
付録 C 溶液密度に密度式と分析データを用いた場合の実効増倍率の比較.....	28
付録 D 中性子スペクトル.....	29

Contents

1. Introduction.....	1
2. Calculation Methods and Conditions.....	1
2. 1 JCO Accident Analyses.....	1
2. 2 Criticality Analyses of STACY Experiment.....	2
2. 3 Criticality Analyses of High Enrichment Uranium Experiment.....	4
3. Determination of Biases for JCO Criticality Accident Analyses.....	5
4. Conclusions.....	6
References.....	6
Appendix A Input Data.....	16
Appendix B Material Data.....	20
Appendix C Comparisons of k_{eff} by Solution Densities Derived from Density Formula and Measured Density.....	28
Appendix D Neutron Spectra.....	29

This is a blank page.

1. 序

筆者らは、平成 11 年 9 月 30 日に(株)ジェー・シー・オー(以下 JCO)の東海事業所の転換試験棟で起きた臨界事故での投入反応度を、臨界解析から求めることを試みてきた。この解析で投入反応度を特定できれば、動特性解析を行うために必要な入力条件のうちの一つを確定することができるが、そのためにはできる限り正確な投入反応度を求めることが要求される。解析結果に影響する因子としては、燃料条件、幾何形状、計算コード、ライブラリーの精度などがある。このうち燃料条件、幾何形状などにはいろいろな不確定要因があるが、本報告書では計算コード、ライブラリーの精度確認を行い、これらに伴う誤差要因をなるべく小さくすることを目的としている。計算コードとしては、世界中で広く臨界解析に使われている連続エネルギーモンテカルロコード MCNP 4B⁽¹⁾を用いた。断面積ライブラリーとしては、米国の最新の評価済み断面積ライブラリーである ENDF/B-VI と、日本の評価済み断面積ライブラリーである JENDL-3.1 と JENDL-3.2 を用いて、臨界実験のベンチマーク解析を行い、実効増倍率を算出し、当該手法のバイアスを算出することを試みた。この報告書では、対象としたベンチマーク実験とその解析結果を示し、さらに JCO 臨界事故の評価に適用すべきバイアス値を求める目的としている。

2. 計算方法および計算条件

2. 1 JCO 臨界事故解析

ベンチマーク計算に触れる前に、JCO の臨界事故の解析手法、条件について簡単に述べる。事故を起こした沈殿槽の製作図面に基づき MCNP 4B において 3 次元の幾何形状を詳細に記述した。MCNP で使った計算モデルの垂直方向の断面図を図 2-1 に示す。沈殿槽の周囲には厚さ約 2.2 cm の冷却水が取り囲んでいる。このため図に記載されている以外の構造材、建屋の壁、事故発生時近くにいた作業員等の中性子反射効果は過大に評価しても 0.2% Δk を超えることはないことが既に確認されている⁽²⁾。沈殿槽内部の中心部分には、溶液燃料を攪拌するための攪拌装置が設置されている。この攪拌装置の垂直方向の位置は製作図面とは異なっており、事故後行われた実測に基づいて決定している。しかし、溶液の中心部にまで挿入されているので 1 cm 程度の位置の不確かさでは、1000 万ヒストリーのモンテカルロ計算で実効増倍率の標準偏差を 0.03% Δk 以下にしても統計上有意な効果は現れない。

燃料条件のうち臨界性に影響を与えるパラメーターとしては、ウラン濃度、ウラン同位体組成、遊離硝酸濃度、溶液体積などである。このうちウラン同位体組成は、事故直後に行われた溶液燃料のサンプリングから U-234:U-235:U-238=0.15wt.%:18.8wt.%:81.05wt.% としている。U-236 は量が 0.002wt.% と少ないために無視している。その他の燃料条件については、サンプリング等の手段では確認ができない。そのため、事故現場に残されていた「臨界管理リリース」という作業手順書から決定した。7 回のバッチに分けて作業が行われ、一回のバッチのウラン溶液量は約 6.5 リットルである。沈殿槽への溶液燃料の注入は一回のバッチを二回に分けて行われたとされている。この作業手順書には溶解したウラン重量と、溶解に使った純水体積、硝酸水の体積が記載されているが、このうち純水と硝酸の体積については精度は不明である。そこでウラン濃度を製品の仕様である 370g/L とし、ウラン重

量からウラン溶液の体積を算出することにした。遊離硝酸濃度は、「臨界管理リリース」記載の値から化学反応式で推定すると約0.48規定となるが、特定は困難である。そこで製品仕様の0.5規定とした。「臨界管理リリース」を要約したものを表2-1に示す。なお7バッチ目のウラン重量は、事故現場に残されていた未注入分を差し引いたものである。結局最終的に44.83リットル注入したとしている。

図2-1における液面の位置は、この溶液の体積から、沈殿槽の内部の構造を考慮して決定している。したがって液位校正を行って決定したわけではないためにそれによる誤差が含まれることになる。以上のように決定した入力条件に対応するMCNPの入力データを付録Aに示す。またこの報告書で計算に使用した原子個数密度等の情報を付録Bに示す。

これまで述べてきたように、JCO臨界事故の臨界解析にあたっては様々な不明なパラメーターが存在するため、以上のように決定したパラメーターで臨界計算を行って、後に種々のパラメーターの変動範囲を考慮した感度解析から実効増倍率のとり得る範囲を決定するということになる。

MCNP4Bでの臨界計算には1章で述べたようにポイントワイズのJENDL-3.1, JENDL-3.2, ENDF/B-VIを用いた。計算には、溶液の密度が必要であるが、これには原研で開発された密度式⁽³⁾を用いている。密度式はウラン濃度、遊離硝酸濃度、溶液温度を変数として溶液密度を与える式であり、ウラン濃度、遊離硝酸濃度には上で決定した値を採用した。溶液温度について考察する。燃料は、沈殿槽に注入される前に、U₃O₈を硝酸で溶解することで作られる。このときの温度は約60°Cであるが、沈殿槽への注入までには、ろ過等の工程が必要なために溶液はある程度冷却されていたと考えられる。また、事故発生時に沈殿槽内にあった溶液の約4/7は事故の前日までに沈殿槽に注入されており、充分長い時間冷却されていたと考えられる。残りの約3/7は当日溶解されたために室温までは冷却されていないと考えられる。このために事故発生時の溶液温度は室温より高いと考えられる。なお、事故発生時の気温は水戸地方気象台の発表では約26°Cであった。溶液温度には密度式の基準となっている25°Cを仮定して計算を行った。現実はこれよりも高いと考えられるが、沈殿槽における温度反応度係数は1°Cあたり-3¢ (-0.02% Δk)程度であるので、温度反応度係数を用いることで溶液温度の推定範囲を考慮して反応度を補償することができる。

表2-2には6バッチから1リットルずつ追加していく場合の実効増倍率の結果を示す。三つのライブラリーの結果を比べると、JENDL-3.1とENDF/B-VIがほぼ同じ結果を与えるが、ENDF/B-VIのほうが約0.1% Δkほど大きい。JENDL-3.2は、JENDL-3.1より約1.2% Δkだけ大きい。JENDL-3.2が過大評価になっているのはU-235の共鳴パラメーターがその原因の一つとされている⁽⁴⁾。JENDL-3.2では共鳴領域での捕獲断面積が他のライブラリーよりも小さく、それが他のライブラリーよりも大きな実効増倍率を与える原因となっている。従ってこの過大評価の傾向は濃縮度に依存していると考えられ、濃縮度が高くなると実効増倍率がさらに大きくなることが予想される。

以上の検討によりJCO臨界事故の臨界解析をMCNPで行う上でのライブラリー間の相対的な違いを決定することができた。

2.2 STACY臨界実験解析

次に、前節の手法で求めた実効増倍率が、現実の臨界体系に対してどれだけずれているのかを

知る必要がある。これには過去の臨界実験の解析を行うことで求めることができるが、バイアスを決定しようとしている JCO の沈殿槽になるべく類似の体系が望ましい。何が類似で何が類似でないかについては議論があるが、ウラン濃縮度、ウラン濃度、反射体の有無、均質か非均質か、などがベンチマーク体系と解析対象との“距離”を表す主要なパラメーターと考えられる。JENDL-3.2 を使って計算した場合を例にとると、前述の理由から、濃縮度が高くなると実効増倍率の過大評価の度合いは大きくなる。また、同様にウラン濃度が大きくなると実効増倍率の過大評価の度合いは大きくなる。均質系と非均質系との比較では、非均質系にすることで共鳴吸収が減少するために、均質系よりも過大評価の度合いは小さくなる。核分裂スペクトルを硬めに評価しているライブラリーなら、反射体がない場合は、高速中性子の漏洩が多くなり実効増倍率を過少評価することになる。

JCO 臨界事故での燃料は濃縮度が 18.8% であるが、18.8% 程度のいわゆる中濃縮の均質体系の臨界データは世界的にも極めて限られている。OECD/NEA の国際臨界安全ベンチマーク評価ハンドブック⁽⁵⁾で濃縮度が 20% 程度のいわゆる中濃縮の溶液燃料の臨界実験データを探すと、ロシアで濃縮度 21wt.% の硫酸ウラニルを用いた臨界データが掲載されているが、ベンチマーク体系の実効増倍率が 1.000 に対して、実効増倍率の計算結果が 0.98 程度と極端に低く、またデータ点数も少なく、ベンチマークデータとして用いるにはふさわしくないと考えられる。またそれ以外の溶液燃料の濃縮度範囲について調べると、そのほとんどが濃縮度 90% 程度の高濃縮のものか、濃縮度が 6% 程度の低濃縮のものである。

そのような中にあって原研の定常臨界実験装置 STACY では濃縮度約 10% で臨界実験を実施しており、ウラン濃度も 200~400gU/L であって、世界中にある臨界データの中でも JCO の燃料条件に極めて近いと考えられる。実験は水反射体、裸、コンクリート、ポリエチレン反射体など種々の反射条件で臨界データが取得されている。このうち水反射体付体系は JCO の体系と同じ反射条件であり、また、タンク周辺の構造材の反射効果もほとんどないため、非常に高精度の臨界データが取得されている。そこで STACY の内径 590mm ϕ の円筒タンク(以下通称に従い「600mm ϕ 円筒タンク」)、厚さ 280mm 平板タンクで実施した水反射体付体系の計 12 ケースの臨界実験解析を、JCO 事故解析に用いた MCNP 4B で実施した。600mm ϕ の円筒タンクについては国際臨界安全ベンチマーク評価ハンドブック中の文献番号 LEU-SOL-THERM-004 にある MCNP の入力データを用いた。厚さ 280mm 平板タンクでの臨界データ評価は、JAERI-Tech 99-038⁽⁶⁾ の情報に基づき MCNP 4B で計算を行った。

ここで、JCO の沈殿槽と STACY での反射条件の違いについて検討する。例えば STACY の 600mm ϕ の円筒タンクでは、水反射体を付けた実験では 30 cm 以上の水反射体が側面と底面にあることになり、水反射体の反応度効果は約 2% Δk で飽和している。一方、JCO の沈殿槽の水反射体は側面と底面に約 2.2-2.5cm の厚さがあり、STACY のそれよりかなり薄い。JCO の沈殿槽では、濃縮度が STACY よりも高いために小さい体積で臨界になったことから、漏洩により失われる中性子の割合が大きい。このため反射体の反応度効果は、反射体の厚さが薄いにもかかわらず充分な反射体厚さをもつた STACY の約 2 倍の約 4% Δk ほどである⁽⁷⁾。従って、両体系とも水反射体が充分な反射効果を持っていると言える。

これらの臨界実験では、ウラン溶液の密度は 25°C で測定されている。上で述べたように JCO の沈

殿槽の臨界解析では溶液密度が不明であるために、密度式を用いて算出している。この密度式を用いること以下に述べる理由から溶液密度を過大評価することになる。たとえば STACY の Run125 で使用した燃料では、ウラン濃度 371.9g/L、遊離硝酸濃度 0.8 規定では温度 25°C で 1.524g/cm^3 だが、密度式では同じ条件では 1.527g/cm^3 となる。ウラン濃度は決まっているので、密度式を用いると密度を過大評価している分だけ水の量が多くなり H/U は大きくなる。ウラン濃度 370g/L 程度では、無限体系では H/U が大きいほど実効増倍率(すなわち無限増倍率)が小さくなるが、有限体系では中性子の漏洩量が少なくなるために、実効増倍率は逆に大きくなる。この密度式での密度を用いると分析の密度を用いた場合に比べて STACY では 0.1% Δk 以下ではあるが実効増倍率が高くなる。従ってベンチマーク解析は次節の高濃縮ウランのものも含めて、ウラン濃度、硝酸濃度、温度を用いて溶液密度を密度式で求めることで行った。なお、STACY の体系に対して、分析による密度と密度式から求めた密度を用いて実効増倍率を算出した結果の比較を付録 C に示す。

STACY の 600mm ϕ の円筒タンクと、厚さ 280mm 平板タンクの概要をそれぞれ図 2-2 と図 2-3 に示す。また燃料条件、臨界条件、計算結果を表 2-3 に示す。これらの臨界実験のベンチマークモデルの実効増倍率は、燃料条件が 25°C で測定されているのに対して、実験が 25°C からややずれていることによる差のみである。これは 0.1% Δk 以下なので、これを無視するとベンチマークモデルの実効増倍率は 1.000 となる。

表 2-3 の結果から、JENDL-3.1 では約 0.1% Δk だけ、JENDL-3.2 では約 0.8% Δk だけ STACY の臨界実験を過大評価する結果となったが、ENDF/B-VI ではほぼ一致する。2.1 節の 18.8% 濃縮のときと比較すれば、ライブラリー間の差は小さくなっています、それぞれのライブラリーごとの実効増倍率の差には濃縮度依存性があることが分かる。

2.3 高濃縮ウランの臨界実験の解析

上で述べたように各ライブラリーで計算した結果には濃縮度依存性がある。そこで 18.8% よりもさらに高い濃縮度の臨界ベンチマーク解析を行うこととする。できるだけ沢山の濃縮度の点数があれば望ましいが、世界的に見ても、濃縮度 10% 以下の低濃縮ウランか濃縮度 90% を超える臨界データが大半を占める。国際臨界安全ベンチマーク評価ハンドブックを検索しても、高濃縮ウランに関しては、ホウ素などの吸収体を含むデータなどが多い。JCO の臨界事故と同じ条件のウラン濃度 300~400g/L で、反射体付で、吸収体などを含まないデータは少ない。そのような中から対象としたのは、同ハンドブックの文献番号 HEU-SOL-THERM-002 と HEU-SOL-THERM-003 の中からそれぞれウランの濃度が 334gU/L と 345gU/L のもの、計 12 ケースである。このときのウラン濃縮度は 93.2% である。これらの実験は米国の Rocky Flats Plant で行われたものである。これらは反射体がコンクリートとガラスであり、JCO の沈殿槽の水とは異なっているが、水反射体付きで、吸収体もなく、濃度条件が近いものが国際臨界安全ベンチマークハンドブックになく、やむを得ず水とは異なる反射体付きのものを用いている。これらのベンチマークモデルの実効増倍率は 1.000 である。ただし温度については「室温」としか記述がなく、25°C と仮定しているが、これによる誤差は温度係数を考慮すると 0.1% Δk 以下と推定され、本報告書の目的とする精度では無視できる。それぞれの実験体系の概要を図 2-4 と図 2-5 に示す。

計算結果を表 2-4 に示すが、JENDL-3.2 の過大評価の度合いは大きく、約 1.7% Δk だけ過大評価となっている。また ENDF-B/VI もやや過大評価となっており、0.8% Δk の過大評価となっている。JENDL-3.1 は逆に濃縮度 10% のときよりも小さく、約 0.3% Δk の過少評価となっている。ただし、この結果は溶液密度に密度式の値を用いた結果であって、測定で求めた溶液密度を用いると特に高濃縮ウランの場合には密度式を用いたときよりも約 0.5% Δk ほど実効増倍率が下がる結果となる。

なお、以上の JCO 沈殿槽、STACY 低濃縮ウラン溶液、Rocky Flats Plant 高濃縮ウラン溶液の三つの体系でのスペクトルの相互比較を付録 D に示す。

3. JCO 臨界事故解析のためのバイアス決定

以上の 10% と 93% の二つの濃縮度のベンチマーク解析から次のようなことが言える。JENDL-3.2 は過大評価の度合いが大きく、濃縮度が高くなるとこの過大評価の傾向はさらに大きくなる。ENDF/B-VI にも同様に濃縮依存性が見られるが、過大評価の度合いそのものは JENDL-3.2 ほど大きくない。JENDL-3.1 は濃縮度 10% に対しては実験に近い結果を与えるが、濃縮度が高くなると実効増倍率が低くなる傾向が見られる。しかし、濃縮度依存性は三つのライブラリーの中では最も小さい。

ここで、以上のベンチマーク解析の結果を濃縮度を横軸にとって表示したものを図 3-1 に示す。18.8% 濃縮での実効増倍率のバイアスを決めるには低濃縮側と高濃縮側の実効増倍率を何らかの方法で補間すれば求まるが、実際には濃縮度と実効増倍率は図にあるような直線関係になっているとは限らない。18.8% の濃縮度で実効増倍率が飽和して高濃縮とほとんど変わらないということも充分考えられる。

そこで濃縮度依存性をより詳細に評価するためにモンテカルロ法ではなく、決定論的手法で次のような計算を行った。燃料条件は、ウラン濃度 370g/L、遊離硝酸濃度 0.5 規定で、濃縮度を 10% から 93% の範囲で変化させる。計算体系は JCO の沈殿槽を内径 450mm の円筒体系に近似し、側面と底面には厚さ 2.2 cm の水を設置する。この条件で、まず JENDL-3.1 で実効増倍率が 1.0 になる溶液の高さを計算し、次に同じ溶液高さで JENDL-3.2 と ENDF/B-VI とで実効増倍率を算出する。以上の計算を、汎用核計算コードシステム SRAC⁽⁸⁾ と SN 法中性子輸送計算コード TWODANT⁽⁹⁾ を用いて行った。エネルギー群数は 25 群(高速群 15 群、熱群 10 群)とした。また濃縮度は 10%、18.8%、93.2% 以外にも 40% についても行った。結果を図 3-2 に示す。ライブラリー間の差異は 2 章での MCNP の結果とほぼ一致している。JENDL-3.1 を基準にしたときの他の二つのライブラリーの過大評価の傾向は、低濃縮度側ほど濃縮度に対する勾配が大きいことがこの図から分かる。ただしこの結果は飽くまで JENDL-3.1 を基準にした場合の結果であって、JENDL-3.1(あるいは他のどのライブラリーでも)の濃縮度依存性の傾向は不明であるため、目的とする 18.8% の濃縮度でのバイアスの絶対値を決めることはできない。

しかし、図 3.1 の JENDL-3.1 によるベンチマーク計算の結果を考慮すると、JENDL-3.1 によるバイアス値(計算値から真の値を引いたものと定義する)は、-0.3% ~ 0.1% Δk の範囲にあるとは言える。濃縮度依存性に直線内挿を仮定するなら、濃縮度依存性の小さい JENDL-3.1 の結果に対して内挿することで、内挿に伴う誤差を一番小さくすることができる。すると、18.8% の濃縮度に対する

JENDL-3.1 のバイアス値は 0.0% Δk 付近が最も確からしいと言える。これを基準にとると表 2-2、図 3-2 の結果から、JENDL-3.2 では約+1.2% Δk 、ENDF/B-VI では約+0.1% Δk とすることができる。これらのバイアス値の誤差を正確に見積もるのは困難だが、0.1% Δk 程度が妥当と考えられる。

4. 結論

JCO 臨界事故の投入反応度の推定を MCNP 4B で行うために必要なバイアス評価を行った。濃縮度 18.8%、ウラン濃度 370g/L、遊離硝酸濃度 0.5 規定の燃料条件で JCO の沈殿槽を対象に計算を行ったところ、JENDL-3.1 に対して ENDF/B-VI は約 0.1% Δk 、JENDL-3.2 は約 1.2% Δk だけ実効増倍率が大きくなる。

STACY の濃縮度 10% の溶液ウラン燃料に対するベンチマーク計算結果では JENDL-3.1 では約 0.1% Δk だけ、JENDL-3.2 では約 0.8% Δk だけ STACY の臨界実験を過大評価するが、ENDF/B-VI ではほぼ一致する結果となった。

Rocky Flats Plant で行われた濃縮度 93.2% の溶液ウラン燃料に対するベンチマーク計算結果では JENDL-3.1 では約 0.3% Δk だけ過少評価し、JENDL-3.2 では約 1.7% Δk 、ENDF/B-VI では約 0.8% Δk だけ臨界実験を過大評価する結果となった。

以上の結果より、JCO の臨界事故を MCNP 4B で計算するに当たってのバイアス値は、JENDL-3.1 では 0.0% Δk 、JENDL-3.2 では約+1.2% Δk 、ENDF/B-VI では約+0.1% Δk とすることができる。

参考文献

- (1) MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-12625-M, (Briesmeister, J.F. Ed.), (1997).
- (2) 山本俊弘他、私信。
- (3) Sakurai, S. and Tachimori, S :Density Equation of Aqueous Solution Containing Plutonium (IV), Uranium (VI) and Nitric Acid, *J.Nucl.Sci.Technol.*, **33**, 187 (1996).
- (4) 「シグマ」特別専門委員会:「シグマ委員会」における核データ収集・評価活動 – 1997, 1998 年度の作業報告一、日本原子力学会誌, Vol.41, No.12, 1213 (1999).
- (5) Briggs, J.B., Dean, V.F. and Scott, Lori :Status of the International Criticality Benchmark Evaluation Project (ICSBEP), Proc. Sixth Int. Conf. Nuclear Criticality Safety, 140, Versailles, France (1999).
- (6) 菊地司、三好慶典、鳥井義勝、山根祐一、外池幸太郎 : 10% 濃縮硝酸ウラニル水溶液の平板形状基本炉心の臨界特性、JAERI-Tech 99-038 (1999).
- (7) 第4回 NUCEF セミナーワーキンググループ:第 4 回 NUCEF セミナー講演報文集、JAERI-Conf 2000-012 (2000).
- (8) 奥村啓介、金子邦男、土橋敬一郎: SRAC95; 汎用核計算コードシステム、JAERI-Data/Code 96-015 (1996).
- (9) Alcouffe, R.E. et al. :DANTSYS: A Diffusion Accelerated Neutral Particle Transport Code System, LA-12969-M (1995).

表2-1 溶解ウランの沈殿槽への投入量

No.	溶解バッチNo.	溶解ウラン量 (kg)	溶解ウラン 体積 V0(L)	溶解ウラン 合計(kg)	ウラン量 ¹⁾ (kg)	ウラン濃度 (gU/L)	硝酸濃度 (N)	ウラン量 合計 (kg)	ウラン体積 V1(L)	液体積 V2(L)	液体積 合計
1	D-U-990028	2.405	6.500	2.405	2.405	370.0	0.5	2.405	6.500	6.50	6.50
2	D-U-990029	2.431	6.570	4.836	2.431	370.0	0.5	4.836	6.570	13.07	
3	D-U-990030	2.244	6.065	7.080	2.244	370.0	0.5	7.080	6.065	19.14	
4	D-U-990031	2.630	7.108	9.710	2.630	370.0	0.5	9.710	7.108	26.24	
5	D-U-990032	2.268	6.130	11.978	2.268	370.0	0.5	11.978	6.130	32.37	
6	D-U-990033	2.409	6.511	14.387	2.409	370.0	0.5	14.387	6.511	38.88	
7	D-U-990034	2.384	6.443	16.771	2.201	370.0	0.5	16.588	5.949	44.83	
	合計		16.771		平均ウラン濃度(gU/L)=	370.0					

1) バッチのウラン量は未投入分の182.7gを引いた値

表2-2 断面積ライブラーの影響の評価

バッチNo.	ウラン濃度 (gU/l)	硝酸濃度 (N)	溶液体積 合計 V2(L)	沈殿槽 溶液体積 H(cm)	JENDL-3.1			JENDL-3.2			ENDF/B-VI		
					Keff	F.S.D	Keff	F.S.D	Keff	F.S.D	Keff	F.S.D	ヒストリー
6	370	0.5	38.88	27.26	0.98373	± 0.00051	0.99663	± 0.00049	0.98576	± 0.00051	0.98576	± 0.00051	300万
6-1	370	0.5	39.88	27.897	0.99315	± 0.00053	1.00454	± 0.00048	0.99260	± 0.00053	0.99260	± 0.00053	300万
6-2	370	0.5	40.88	28.53	1.00170	± 0.00049	1.01195	± 0.00048	1.00127	± 0.00051	1.00127	± 0.00051	300万
6-3	370	0.5	41.88	29.16	1.00760	± 0.00049	1.01956	± 0.00050	1.00943	± 0.00051	1.00943	± 0.00051	300万
6-4	370	0.5	42.88	29.796	1.01644	± 0.00052	1.02779	± 0.00052	1.01628	± 0.00050	1.01628	± 0.00050	300万
6-5	370	0.5	43.88	30.43	1.02471	± 0.00049	1.03363	± 0.00052	1.02521	± 0.00051	1.02521	± 0.00051	300万
7	370	0.5	44.83	31.0298	1.02926	± 0.00039	1.04075	± 0.00038	1.03043	± 0.00039	1.03043	± 0.00039	500万

表2-3 低濃縮ウランのMCNP 4Bによるベンチマーク計算結果

	Case No.	ウラン濃度 (gU/L)	遊離硝酸濃度(N)	温度 °C	液位 (cm)	Keff		
						JENDL-3.1	JENDL-3.2	ENDF/B-VI
STACY 600 φ	1	310.1	2.17	23.1	41.53	0.99938 ± 0.00051	1.00833 ± 0.00049	0.9944 ± 0.00046
	29	290.4	2.23	24.8	46.70	1.00160 ± 0.00043	1.00882 ± 0.00045	1.0014 ± 0.00043
	33	270.0	2.20	24.7	52.93	0.99911 ± 0.00044	1.00708 ± 0.00043	0.99671 ± 0.00043
	34	253.6	2.24	24.8	64.85	1.00215 ± 0.00042	1.00769 ± 0.00045	0.99869 ± 0.00040
	46	241.9	2.27	24.6	78.56	1.00160 ± 0.00041	1.00804 ± 0.00039	0.99965 ± 0.00041
	51	233.2	2.28	22.4	95.50	0.99997 ± 0.00039	1.00602 ± 0.00041	0.99842 ± 0.00036
	54	225.3	2.28	23.3	130.33	1.00039 ± 0.00037	1.00626 ± 0.00037	0.99820 ± 0.00040
	105	464.2	0.85	23.8	40.09	1.00301 ± 0.00051	1.01195 ± 0.00057	1.00298 ± 0.00054
	125	371.9	0.80	23.1	51.37	1.00207 ± 0.00049	1.00971 ± 0.00053	1.00263 ± 0.00051
	129	350.8	0.80	23.7	56.96	1.00189 ± 0.00047	1.00949 ± 0.00049	1.00216 ± 0.00049
STACY 280T	140	311.4	0.96	21.7	81.47	1.00042 ± 0.00047	1.00736 ± 0.00048	1.00101 ± 0.00046
	196	299.6	0.97	22.8	102.34	1.00175 ± 0.00046	1.00881 ± 0.00043	1.00142 ± 0.00045
	平均値 ± 標準偏差				1.00111 ± 0.00122	1.00830 ± 0.00164	1.00012 ± 0.00196	
	標準偏差							

表2-4 高濃縮ウランのMCNP 4Bによるベンチマーク計算結果

	Case No.	ウラン濃度 (gU/L)	遊離硝酸濃度(N)	温度 °C	液位 (cm)	Keff		
						JENDL-3.1	JENDL-3.2	ENDF/B-VI
HEU-SOL-THERM-002	3				27.23	0.99470 ± 0.00149	1.01554 ± 0.00160	1.00576 ± 0.00149
	4				21.79	0.99879 ± 0.00153	1.01808 ± 0.00152	1.01341 ± 0.00144
	7	334.77	0.521		28.60	0.99457 ± 0.00140	1.01536 ± 0.00150	1.00814 ± 0.00160
	8				22.30	0.99800 ± 0.00147	1.02070 ± 0.00207	1.01187 ± 0.00138
	13				21.50	0.99757 ± 0.00154	1.01420 ± 0.00144	1.00729 ± 0.00145
	14				16.78	1.00181 ± 0.00157	1.02257 ± 0.00155	1.01349 ± 0.00145
	5				27.60	0.99396 ± 0.00167	1.01233 ± 0.00195	1.00857 ± 0.00170
	6				22.75	0.99351 ± 0.00175	1.01670 ± 0.00196	1.00590 ± 0.00145
	10	345.33	0.534		28.84	0.99325 ± 0.00155	1.01319 ± 0.00180	1.00418 ± 0.00186
	11				22.87	1.00110 ± 0.00202	1.02077 ± 0.00173	1.00903 ± 0.00225
HEU-SOL-THERM-003	18				21.67	0.99441 ± 0.00229	1.01247 ± 0.00198	1.00311 ± 0.00242
	19				17.20	1.00078 ± 0.00236	1.02112 ± 0.00162	1.01026 ± 0.00242
平均値 ± 標準偏差					0.99687 ± 0.00319	1.01692 ± 0.00365	1.00842 ± 0.00340	
標準偏差								

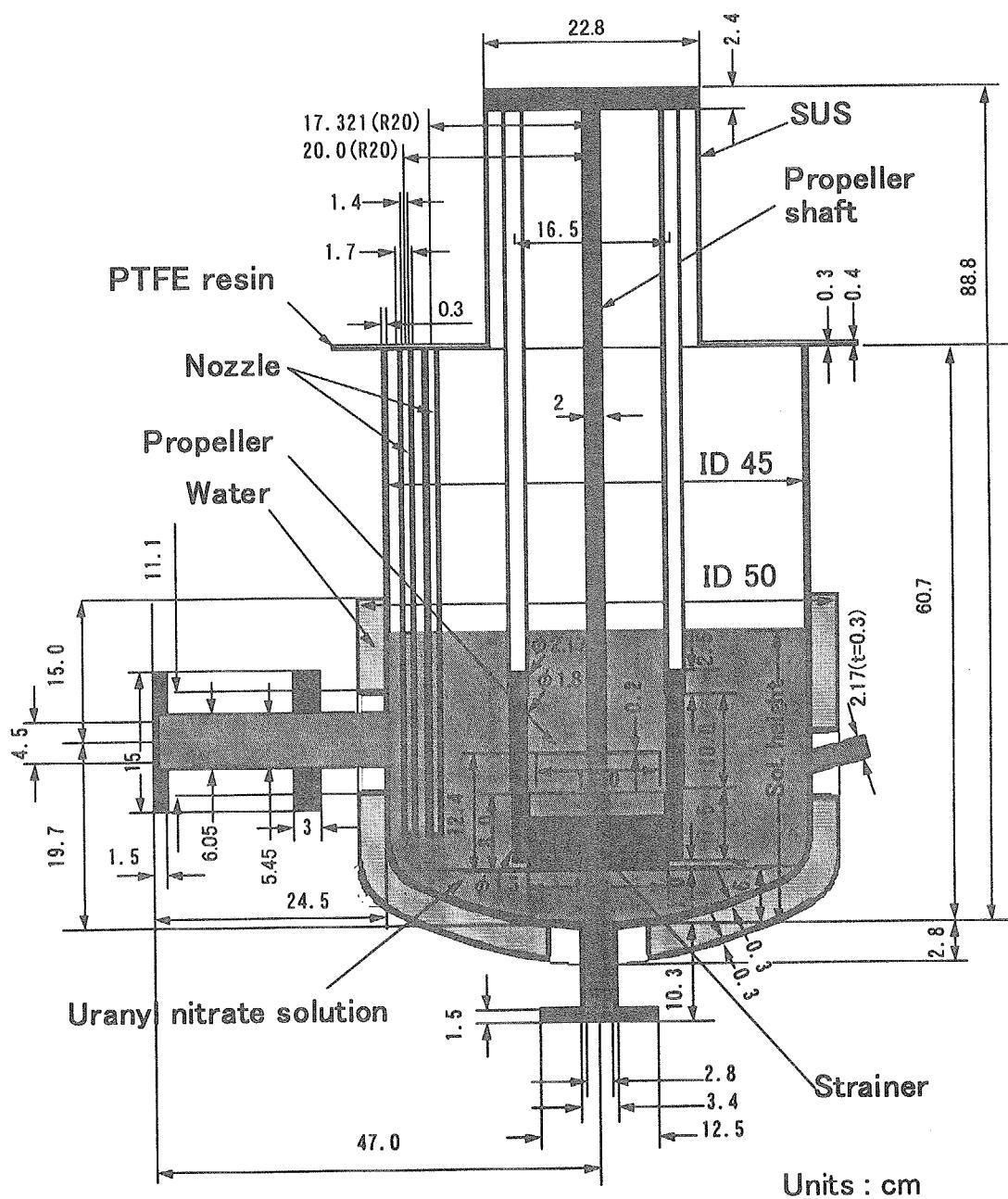


図 2-1 JCO 沈殿槽の MCNP 計算モデル(垂直断面図)

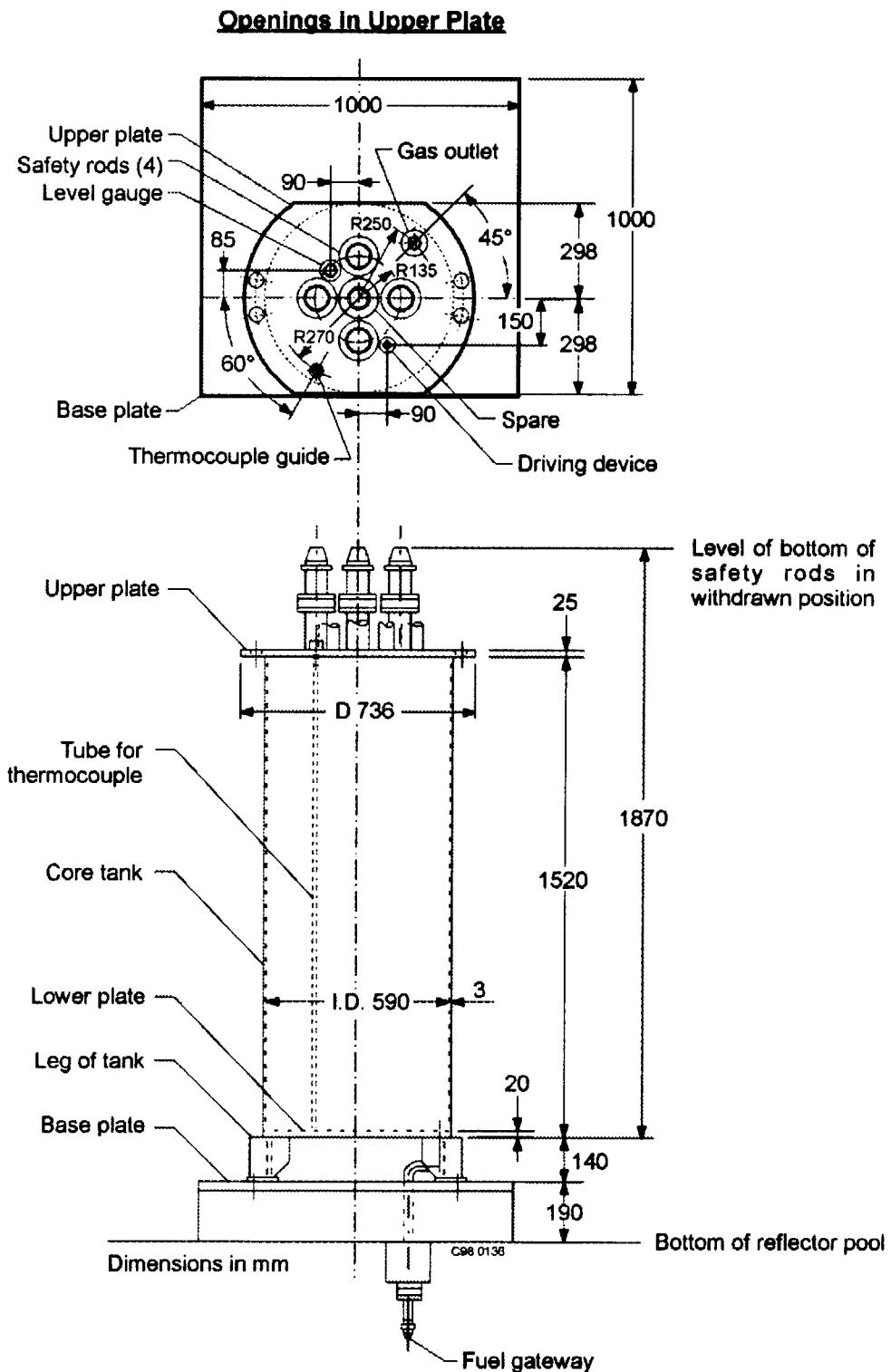


図 2-2 STACY600 φ円筒タンク

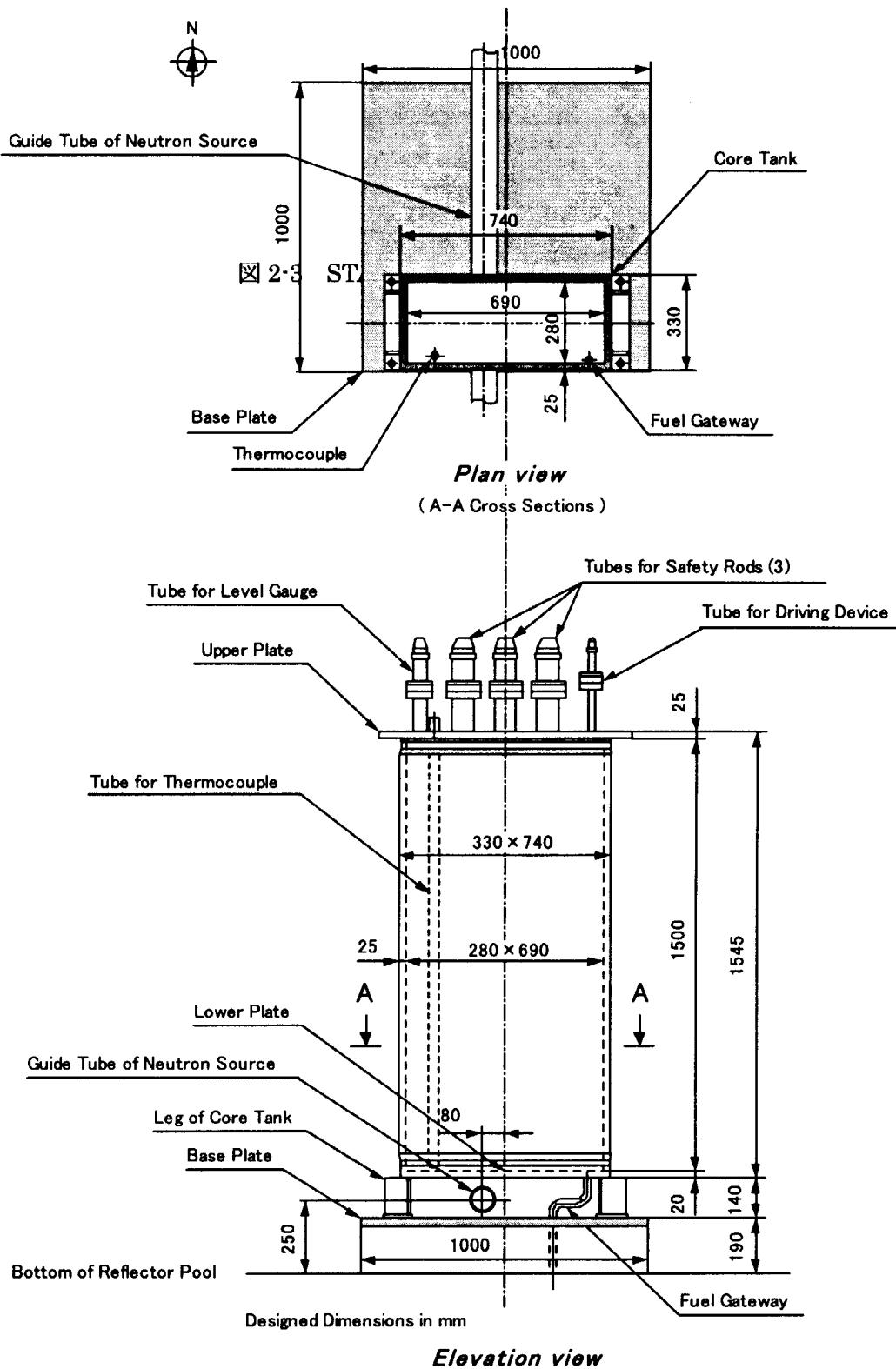


図 2-3 STACY280T 平板タンク

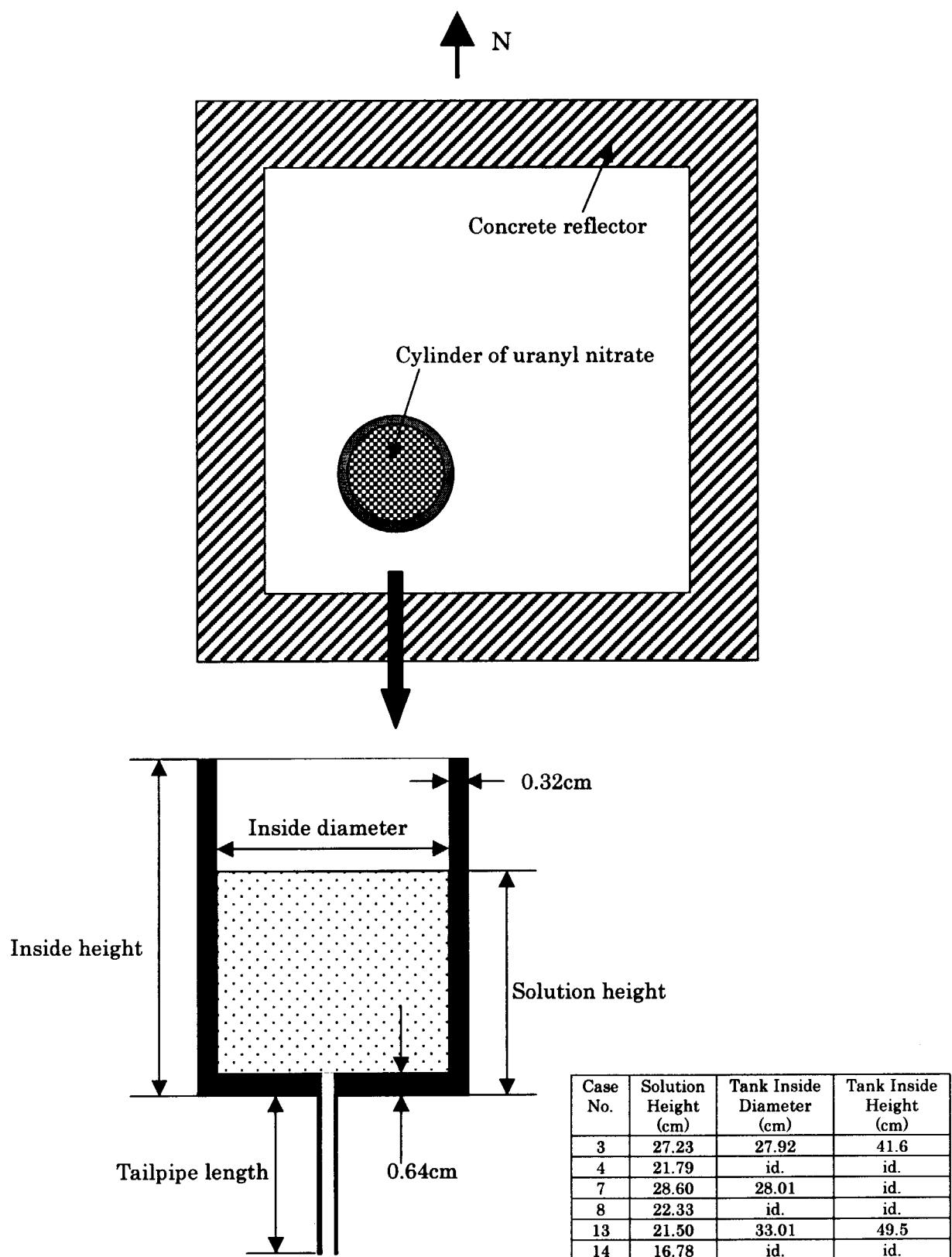


図 2-4 HEU-SOL-THERM-002 実験概要

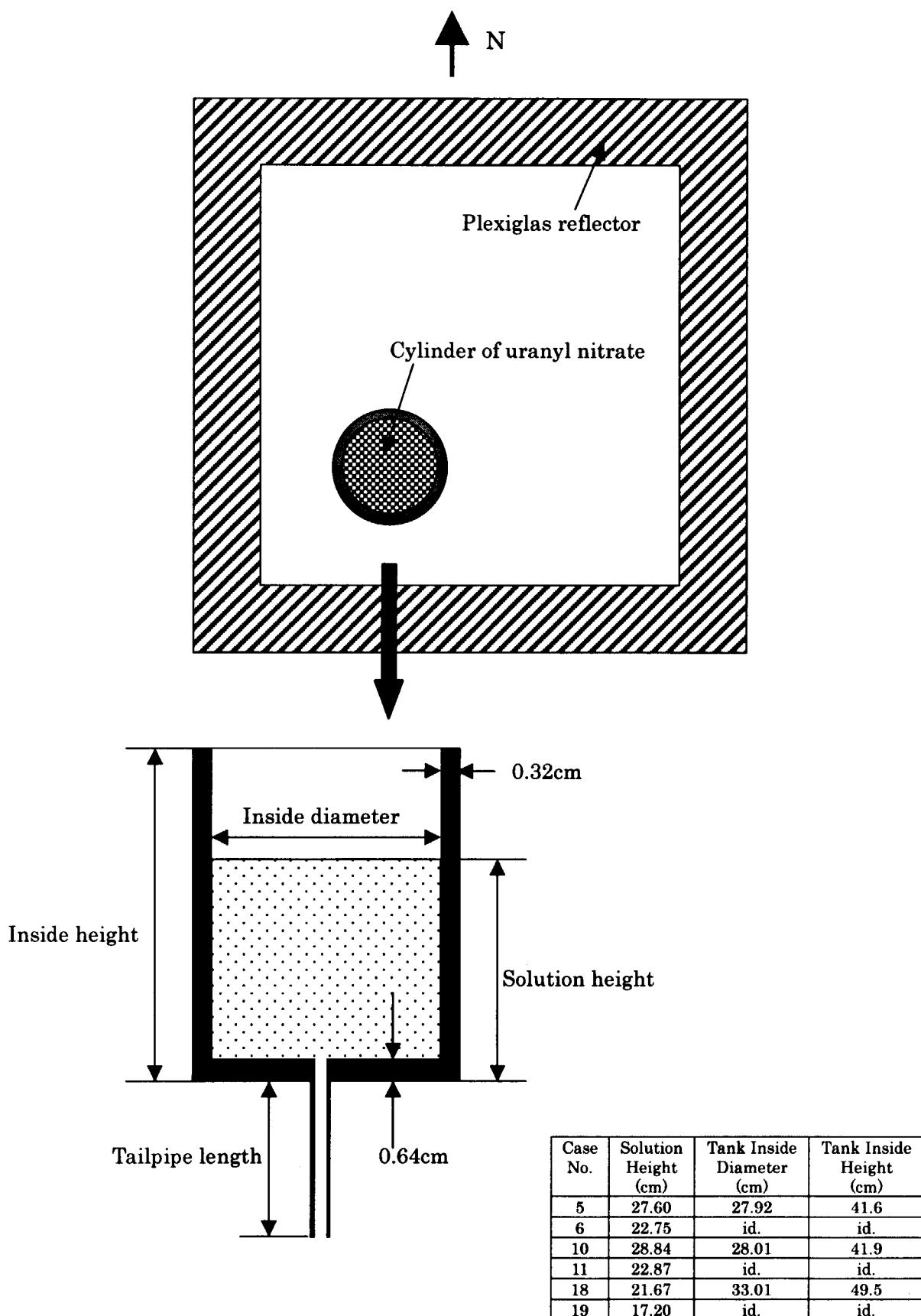


図 2-5 HEU-SOL-THERM-003 実験概要

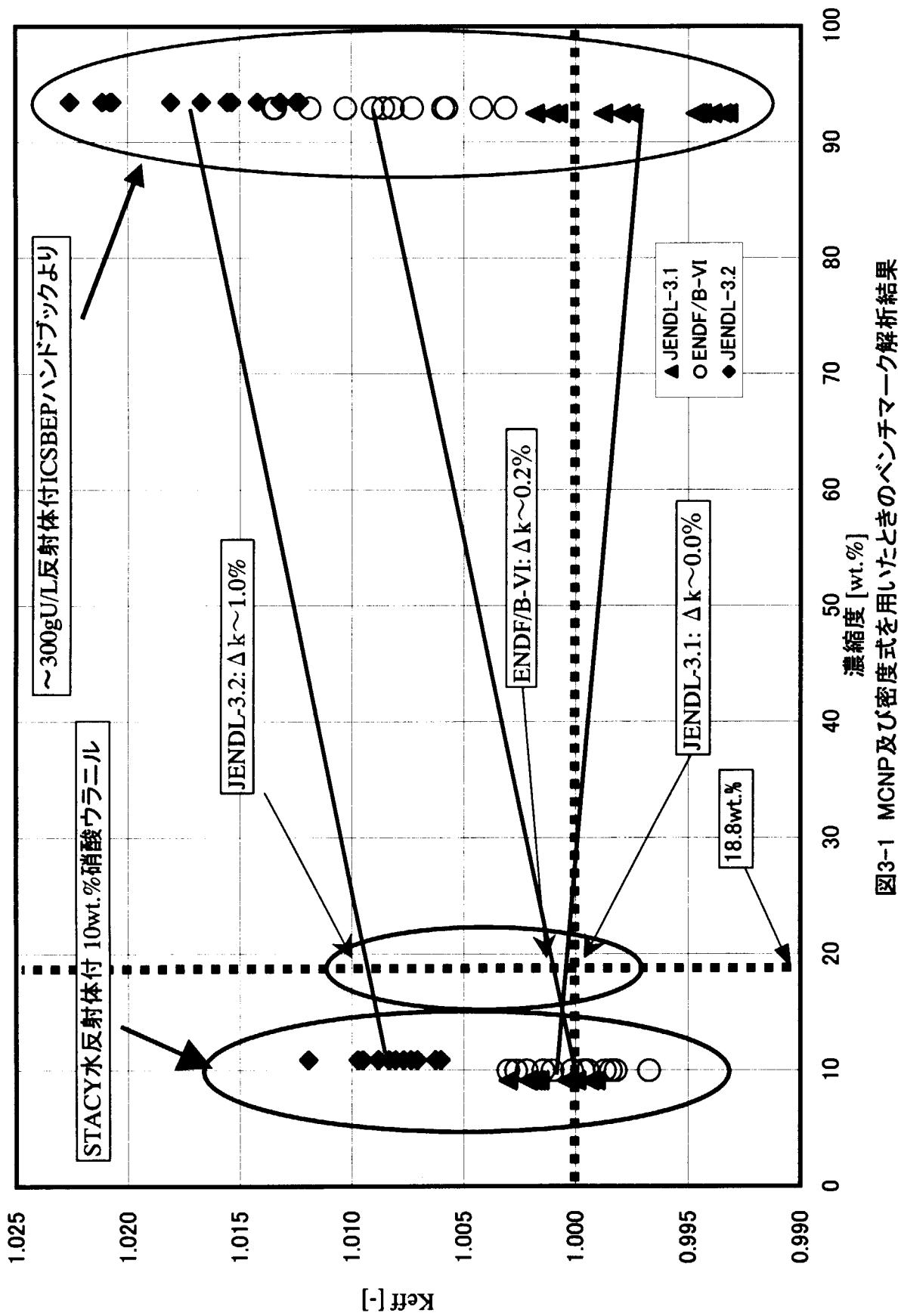
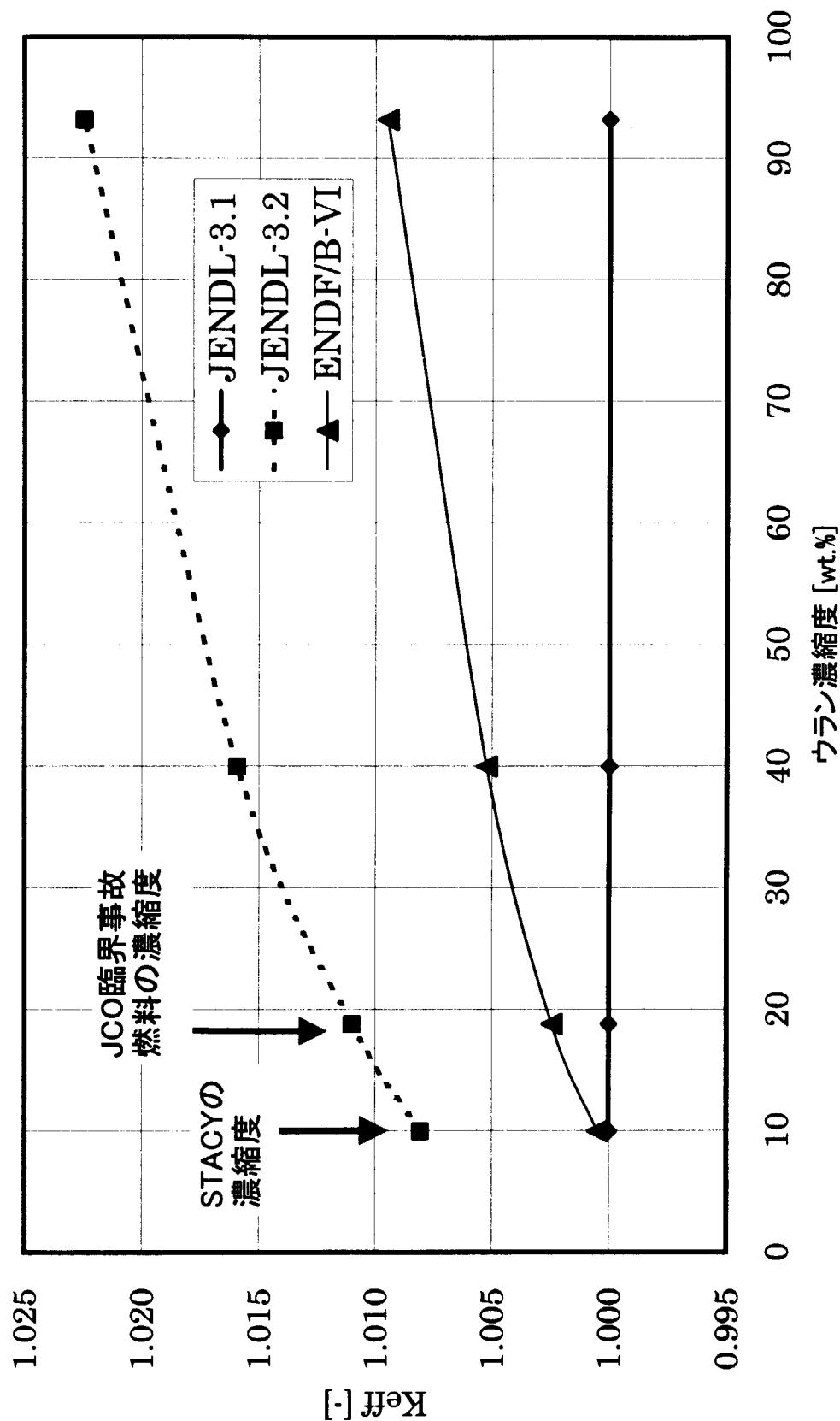


図3-1 MCNP及び密度式を用いたときのベンチマーク解析結果

図3-2 JENDL-3.1で $K_{\text{eff}}=1.0$ になる体系でのJENDL-3.2とENDF/B-VIの K_{eff}

付録 A 入力データ

JCO 沈殿槽の MCNP 計算モデルを以下に示す。

```

input = JCO Core tank :H=31.04429(cm) 44.83L Stand pipe= 24.3 cm
c
c    7 batch all fuel poured 44.83 liter
c    cellcard
c
1  2   8.684498e-2   -50 32 -30 #(56 -57) imp:n=1
c  2   2   8.684498e-2   -9 31 -26      imp:n=1
c  3   2   8.684498e-2   -9 31 -27      imp:n=1
51  2   8.684498e-2   -41 40 44 -9     imp:n=1
52  2   8.684498e-2   -43 42 45 -9     imp:n=1
53  2   8.684498e-2   -43 44 -45      imp:n=1
6   1   9.91428196E-02   -1 -132      imp:n=1
130 1   9.91428196E-02 (-130:-133) -131 132
#51 #52 #53
#68 #69
#80 #81 #82 #83 #84 imp:n=1
131 1   9.91428196E-02 131 -33 -5
#1 #62 #63 #64 #65
#51 #52 #53 #61
#66 #67 #68 #69 #70 #71
#80 #81 #82 #83 #84
imp:n=1
c
7   5   1.0e-5   -9   -1 -5 33 #1 #62 #63
#64 #65 #51 #52 #53 #61
#66 #67 #68 #69 #70 #71 #80 #81 #82 #83 #84
imp:n=1
8   2   8.684498e-2 5 131 -6 -9 #(-17 -34) #(34 -53) imp:n=1
132 2   8.684498e-2 -131 #130 (-134:-136) 135 #6
#68 #69 #80 #81 #82 #83 #84
imp:n=1
133 2   8.684498e-2 #130 #131 (-134:-136) -135 -2 12 #6 imp:n=1
9   4   1.4396547e-1 9 -10 -48
imp:n=1
54  5   1.0e-5   9 -10 -48
imp:n=1
55  2   8.684498e-2 -47 49 -46 10
imp:n=1
56  2   8.684498e-2 50 -51 -49
imp:n=1
57  5   1.0e-5   -50 -48 9 #1 #62 #63
imp:n=1
60  2   8.684498e-2 10 48 -49 -50
imp:n=1
10   2   8.684498e-2 2 12 -13 11 -10
imp:n=1
11   1   9.91428196E-02 1 -12 11 -10
imp:n=1
12   2   8.684498E-02 -11 35 -13
imp:n=1
13   3   9.99849000E-02 15 #6 #130 #132 #133
-7 -3 -131 #(-155 132 -131) 171
imp:n=1
180 3   9.99849000E-02 15 #6 #130 #132 #133
-7 #(-155 132 -131) -171 195
-170 imp:n=1
185 3   9.99849000E-02
195 -136 2 170 -9
imp:n=1
181 3   9.99849000E-02 15 #6 #130 #132 #133
-3 #(-155 132 -131) -195
imp:n=1
140 3   9.99849000E-02 #8 #(34 -20) #(34 -24)
6 -7 -16 131
imp:n=1
14   1   9.91428196E-02 -34 5 21 -17
imp:n=1
15   2   8.684498E-02 2 -3 14 -15 -10
imp:n=1
16   2   8.684498E-02 #(-7 -3) -4 -8 -16 14 #(-19 -34)
#(34 -23) #(174 -171)
imp:n=1
182 2   8.684498E-02 -176 136
170 195 -171
imp:n=1
183 2   8.684498E-02 -176 3
-195 174
imp:n=1
17   2   8.684498E-02 22 -18 -34 6 #(21 -17 5) imp:n=1
18   2   8.684498E-02 16 -36 -8 6
imp:n=1
19   2   8.684498E-02 -34 19 -20 6 -7
imp:n=1
20   5   1.0e-5   -34 18 -19 6 -8
imp:n=1
21   5   1.0e-5   -9 13 -14 2 -4
imp:n=1
22   2   8.684498E-02 34 6 -7 23 -24
imp:n=1
23   5   1.0e-5   34 6 -8 -23 -53
imp:n=1
58   1   9.91428196E-02 -52 5 -54 34
imp:n=1 $ N-9
59   2   8.684498E-02 5 -53 -55 34 #(-54 -52)
imp:n=1 $ N-9
61   6   8.609023E-02 56 -57 -58
imp:n=1 $ Prop
62   2   8.684498E-02 -26 65 72 -50
imp:n=1
63   2   8.684498E-02 -27 66 72 -50
imp:n=1
64   5   1e-5   72 -65 -9
imp:n=1
65   5   1e-5   72 -66 -9
imp:n=1
66   2   8.684498E-02 -59 71 -63
imp:n=1
67   2   8.684498E-02 -59 71 -64
imp:n=1
68   2   8.684498E-02 31 -71 -61
imp:n=1
69   2   8.684498E-02 31 -71 -62
imp:n=1
70   2   8.684498E-02 59 -72 -26
imp:n=1 $phi 21.7 nakami ari
71   2   8.684498E-02 59 -72 -27
imp:n=1 $phi 21.7 nakami ari
c
80   2   8.684498E-02 -83 84 80 -82
imp:n=1
81   2   8.684498E-02 -84 -85 86 80 -81
imp:n=1
82   2   8.684498E-02 #81 -84 -87 88 80 -81
imp:n=1
83   2   8.684498E-02 #81 #82 -84 -89 90 80 -81
imp:n=1
84   2   8.684498E-02 #81 #82 #83 -84 -91 92 80 -81
imp:n=1
c
120  2   8.684498E-02 18 -193 121 -120
imp:n=1
121  2   8.684498E-02 18 -193 22 -122
imp:n=1
122  2   8.684498E-02 35 -125 13 -124
imp:n=1
c
50   5 1e-5 -100 (4:8) -36 #14 #17 #120 #121 #58 #59
#122 #11 #10 #12 (171:-174)
imp:n=1
161  5 1e-5 -100 -171 174 136 176
imp:n=1
100  5 1e-5 -100 36 -9   6      imp:n=1
160  5 1e-5 9 #9 #55 (51:49) -100  imp:n=1
150  0   100                                imp:n=0
c
c    surface cards (origin x=0.0 y=0.0 z=0.0)
c
c
120  px   -29.3
121  px   -32.3
122  px   -45.5
193  cz   0.0 19.7 7.5
124  pz   -8.8
125  cz   6.25
c
c    fuel
c
1   sz   45.0 45.0 $
130  tz   0.0 0.0 8.71984013 18. 4.5 4.5
131  pz   8.71984013
132  pz   4.68871126
133  cz   20.0
2   sz   45.0 45.3 $
134  tz   0.0 0.0 8.71984013 18. 4.8 4.8
135  pz   4.4199693
136  cz   20.13333
155  cz   15.000
c
170  tz   0.0 0.0 7.188705 20. 5.00 5.00
171  pz   7.18871126
195  pz   2.709684
174  pz   2.44093614
175  pz   22.355553
194  pz   22.2221
176  tz   0.0 0.0 7.188705 20. 5.301 5.301
c
3   sz   47.5 50.0 $
4   sz   47.5 50.3 $
5   cz   22.5
6   cz   22.8
7   cz   25.0
8   cz   25.3
9   pz   60.7
c
c    Packing top
10  pz   61.0
c
c    Tank top
46  pz   61.4
c
47  cz   27.815
c
48  cz   11.0
49  cz   11.4
c
c
50  pz   85.7
51  pz   88.1
c
c    N-11
c
11  pz   -10.0
35  pz   -10.3
12  cz   1.4
13  cz   1.7
14  cz   5.415
15  cz   5.715
c
c    jacket top
16  pz   34.4
36  pz   34.7
c
c
17  cx   0.0 19.7 2.725
18  cx   0.0 19.7 3.025
19  cx   0.0 19.7 5.25
20  cx   0.0 19.7 5.55
21  px   -46.7
22  px   -47.0
c
c
c
23  cx   0.0 16.7 3.5
24  cx   0.0 16.7 3.8
25  px   28.0
c
c
40  cz   0.0 -20.0 0.7
41  cz   0.0 -20.0 0.865
42  cz   -10.0 -17.321 0.7
43  cz   -10.0 -17.321 0.865
44  pz   9.6887
45  pz   9.9887
c
c
26  cz   8.25 0.0 1.085
27  cz   8.25 0.0 1.085

```

```

30  cz  1.0
31  pz  6.7    $ strainer support bottom (15 phi)
32  pz  14.2   $ 15 phi top
32  pz  16.94  $ Not bottom
36  pz  17.90  $ Prop bottom
37  pz  18.10  $ Prop top
38  cz  6.5    $ Prop diam.
39  pz  24.2   $ 18 phi rod top
72  pz  26.7   $ 21.7 phi rod bottom
c
61  cz  8.25  0.0  0.75
62  cz -8.25  0.0  0.75
63  cz  8.25  0.0  0.9
64  cz -8.25  0.0  0.9
65  cz  8.25  0.0  0.785
66  cz -8.25  0.0  0.785
c  67  cz  8.25  0.0  0.35
c  68  cz -8.25  0.0  0.35
c  69  cz  8.25  0.0  0.6
c  70  cz -8.25  0.0  0.6
c
c  N-9
c
52  1 cx  0.785
53  1 cx  1.085
54  1 px  3.35
55  1 px  3.50
c
c  Strainer
c
80  pz  5.7    $ Strainer bottom
81  pz  11.2   $ Strainer top
82  pz  13.7   $ Strainer entrance
83  cz  7.45   $ Strainer OD
84  cz  7.25   $ Strainer ID
85  py  0.1    $
86  py -0.1   $
87  p  1.0 1.0 0.0  0.141421  $
88  p  -1.0 1.0 0.0 -0.141421  $
89  p  -1.0 1.0 0.0  0.141421  $
90  p  -1.0 1.0 0.0 -0.141421  $
91  px  0.1
92  px -0.1
c
c  Solution height
c
33  pz  31.04429
c
34  px  0.0
100 so  200.

c
c  data cards
c
mode n          $ transport neutrons only
*tr1  25.88074 0 17.6058 15 90 75 90 0 90 105 90 15 1
c
c  material cards
c  R001(water) ;U=310.1(g/lit) A=2.17(mol/lit) D=1.4827(g/cc)
c  atomic density = 9.91428196E-02
m1  1001.34c  5.8512E-02
      7014.34c  2.1777E-03
      8016.34c  3.7515E-02
      92234.34c 1.4319E-06
      92235.34c 1.7822E-04
      92238.34c 7.5863E-04
mt1  lwtr.01t  $ 300k
c
c  sus304L 8.684498e-2atom/cm3
m2  6012.34c  4.3736e-5  $ C
      14000.34c 1.0627e-3  $ Si
      25055.34c 1.1561e-3  $ Mn
      15031.34c 4.3170e-5  $ P
      16000.34c 2.9782e-6  $ S
      28000.34c 8.3403e-3  $ Ni
      24000.34c 1.6775e-2  $ Cr
      26000.34c 5.9421e-2  $ Fe
c
c  water (STACY) 298.15K
c  atomic density 9.99849E-02
m3  1001.34c  6.66566E-02
      8016.34c  3.33283E-02
mt3  lwtr.01t  $ 300k
c
c  Rubber Seal = 1.4396547e-1
m4  1001.34c  8.8660E-02  $ H
      8016.34c  9.4815E-04  $ O
      6012.34c  5.4065E-02  $ C
      7014.34c  2.9332E-04  $ N
mt4  poly.01t  $ 300K
c
c  air
m5  7014.34c  1.0
c
c  sus316 8.608336e-2atom/cm3
m6  6012.34c  3.1729e-4  $ C
      14000.34c 1.6962e-3  $ Si
      25055.34c 1.7343e-3  $ Mn
      15031.34c 6.9206e-6  $ P
      16000.34c 4.4572e-5  $ S
c
c  criticality cards
c
kcode 5000 1.0 50 450
sdef cel=d1 pos=0 0 0 axs=0 0 1 rad=d2 ext=d3 erg=d4
c
si1  1 6:4:1
sp1   1
c
si2  h  0.0  29.50
sp2  -21  1
c

```

```

si3 h 0.0 41.53
sp3 .21 0
c
sp4 .3
c
prdmp j .100 1 3
c
print .175

```

STACY280T の MCNP 計算モデルを以下に示す。

```

STACY 280t Core tank critical analysis.
c R105(water) ;Hc=40.09cm U=311.2(g/lit) A=0.94(mol/lit)
c
c cellcard
c
1 1 9.83426645E-02 1 -2 3 -4 5 -7 imp:n=1 u=1
2 4 4.94250000E-05 1 -2 3 -4 7 -6 imp:n=1 u=1
3 2 8.66829700E-02 #1 #2 imp:n=1 u=1
4 0 11 -12 13 -14 15 -16 imp:n=1 u=2 fill=1
5 3 9.99870000E-02 #4 imp:n=1 u=2
6 0 21 -22 23 -24 25 -26 imp:n=1 fill=2
7 0 #6 imp:n=0

```

```

c
c surface cards (origin x=0.0 y=0.0 z=0.0)
c fuel

```

```

1 px -34.5
2 px 34.5
3 py -14.0
4 py 14.0
5 pz 0.0
6 pz 150.0
c Critical level
7 pz 40.09
c sus304
c
11 px -37.0
12 px 37.0
13 py -16.5
14 py 16.5
15 pz -2.5
16 pz 152.5
c water
c
21 px -100.0
22 px 100.0
23 py -56.5
24 py 56.5
25 pz -35.5
26 pz 172.5

```

```

c
c data cards
c mode n $ transfort neutrons only
c
c material cards
c
c R105(watr);U=464.2/A=0.852/D=1.6462
c atomic density = 9.81034711E-02

```

```

m1 1001.34c 5.5745E-02
7014.34c 2.8635E-03
8016.34c 3.8559E-02
92234.34c 9.5555E-07
92235.34c 1.1858E-04
92236.34c 1.1843E-07
92238.34c 1.0562E-03

```

```

mt1 lwtr.01t $ 300k
c
c sus304L(tank) 7.93g/cm3
c atomic density 8.668297E-2
m2 6012.34c 7.1567E-05 $ C
14000.34c 7.1415E-04 $ Si
25055.34c 9.9095E-04 $ Mn
15031.34c 5.0879E-05 $ P
16000.34c 1.0424E-05 $ S
28000.34c 8.5600E-03 $ Ni
24000.34c 1.6725E-02 $ Cr
26000.34c 5.9560E-02 $ Fe

```

```

c
c water (STACY) 298.15 K
c atomic density 9.9987E-02
m3 1001.34c 6.6658E-02
8016.34c 3.3329E-02
mt3 lwtr.01t $ 300k
c
c air (0.001184 g/cm3)
c atomic density 4.9425E-05
m4 7014.34c 3.9016E-05
8016.34c 1.0409E-05
c
c default energy bins: hansen-roach structure
e0 1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0
c
c tallies
f4:n 1 $ ave flux in cell 1

```

```

c
c criticality cards
c
kcode 5000 1.0 50 450
sdef cel=d1 x=d2 y=d3 z=d4 erg=d5
c
si1 1 6:4:1
sp1 1
c *** x-coordinate
si2 h -34.5 34.5
sp2 0 1
c *** y-coordinate
si3 h -14.0 14.0
sp3 0 1
c *** z-coordinate
si4 h 0.0 40.09
sp4 0 1
c
sp5 -3
c
prdmp j .100 1 3
c
print .175
c ctme 10

```

HEU-SOL-THERM-002 の MCNP 計算モデルを以下に示す。

```

ROT7 Tank in center(334.77 g/U/-27.92cm diam cylinder)
1 1 +9.92267-02 -1 +3 -5 $CYLINDER OF
SOL,
2 0 -1 +5 -6 $CYLINDER VOID
3 2 +8.7213-02 +1 -2 +3 -6 : 2 +4 -3 $CYLINDER OF
4 0 (+2:-4:+6) -7 +8 -9 +10 -11 +12 $CUBOID VOID
5 0 -13 +14 -15 +16 +11 -19 $0.635 cm Void
6 0 -13 +14 -15 +16 -12 +20 $0.635 cm Void
7 3 +7.8022-02 (-7:-8+9:-10) -13 +14 -15 +16 -11 +12 $CONCRETE
8 3 +7.8022-02 (+19:-20) -13 +14 -15 +16 -17 +18 $CONCRETE
9 0 +13:-14+15:-16+17:-18 $ZIOW

```

```

1 cz 13.96 $ id of cylinder
2 cz 14.28 $ od of cylinder
3 pz +0.64 $ top of bottom of tank
4 pz +0.0 $ bottom of bottom of tank
5 pz +27.87 $ top of solution
6 pz +42.24 $ top of tank
7 py +57.4 $ inside of reflector to the north
8 py -64.8 $ inside of reflector to the south
9 px +64.6 $ inside of reflector to the east
10 px -57.2 $ inside of reflector to the west
11 pz +81.365 $ inside of top reflector
12 pz +41.065 $ inside of bottom reflector
13 py +83.1 $ outside of reflector to the north
14 py -90.5 $ outside of reflector to the south
15 px +90.3 $ outside of reflector to the east
16 px -82.9 $ outside of reflector to the west
17 pz +107.4 $ outside of top reflector
18 pz -67.1 $ outside of bottom reflector
19 pz +82.0 $ void top
20 pz -41.7 $ void bottom

```

```

mode n
imp:n 1 7r 0
c hst02
c atomic density = 9.92266536E-02

```

```

m1 1001.34c 5.9133E-02
7014.34c 2.0281E-03
8016.34c 3.7208E-02
92234.34c 8.8035E-06
92235.34c 7.9915E-04
92236.34c 3.7067E-06
92238.34c 4.5495E-05

```

```

mt1 lwtr.01t
m2

```

```

6012.34c 2.6231-04
14000.34c 1.3768-03
15031.34c 3.8530-05
16000.34c 2.8282-05
24000.34c 1.6985-02
25055.34c 1.1209-03
26000.34c 5.9852-02
28000.34c 7.5400-03
42000.34c 8.9563-06

```

```

m3
7014.34c 1.9958-05
8016.34c 4.2362-02
1001.34c 1.0401-02
6012.34c 6.4237-03
11023.34c 3.8303-04
12000.34c 7.1885-04
13027.34c 1.1241-03
14000.34c 7.7139-03
16000.34c 8.2809-05
19000.34c 4.8976-04
20000.34c 8.0213-03
22000.34c 2.9192-05
26000.34c 2.5278-04

```

```
c
c
c
kcode 2500 1.0 20 220
ksrc 0 0 7
print
```

HEU-SOL-THERM-003 の MCNP 計算モデルを以下に示す。

```
ROT9 Tank in center(345.33 gU/l--27.92cm diam cylinder)
1 1 +9.91605-02 -1 +3 -5 $CYLINDER OF
2 0 -1 +5 -6 $CYLINDER VOID
3 2 +8.7213-02 +1 -2 +3 -6 : -2 +4 -3 $Cylinder of
4 0 (+2:-4:+6) -7 +8 -9 +10 -11 +12 $CUBOID VOID
5 3 +1.0676-01 (+7:-8:+9:-10) -13 +14 -15 +16 -11 +12 $Plastic
6 0 -13 +14 -15 +16 +11 -19 $0.635 cm gap
7 0 -10 +7 -13 +16 -17 +19 $Void in
8 0 -10 -8 +14 +16 -17 +19 $Void in
9 0 +9 +7 -13 -15 -17 +19 $Void in
10 0 +9 -8 +14 -15 -17 +19 $Void in
11 4 +1.0416-01 #7 #8 #9 #10 +19 -17 -13 +14 -15 +16 $Plastic
12 0 -10 +7 -13 +16 -12 +18 $Void in
13 0 -10 -8 +14 +16 -12 +18 $Void in
14 0 +9 +7 -13 -15 -12 +18 $Void in
15 0 +9 -8 +14 -15 -12 +18 $Void in
16 4 +1.0416-01 #12 #13 #14 #15 -12 +18 -13 +14 -15 +16 $Plastic
17 0 +13 -14 +15 -16 +17 -18 $ZIOW
```

```
1 cz 13.96 $ id of cylinder
2 cz 14.28 $ od of cylinder
3 pz +0.64 $ top of bottom of tank
4 pz +0.0 $ bottom of bottom of tank
5 pz +28.24 $ top of solution
6 pz +42.24 $ top of tank
7 py +60.4 $ inside of reflector to the north
8 py -62.5 $ inside of reflector to the south
9 px +61.2 $ inside of reflector to the east
10 px -61.7 $ inside of reflector to the west
11 pz +80.765 $ inside of top reflector
12 pz -41.5 $ inside of bottom reflector
13 py +81.2 $ outside of reflector to the north
14 py -83.3 $ outside of reflector to the south
15 px +82.0 $ outside of reflector to the east
16 px -82.5 $ outside of reflector to the west
17 pz +101.6 $ outside of top reflector
18 pz -62.3 $ outside of bottom reflector
19 pz +81.4 $ 0.635 cm gap
```

```
mode n
imp:n 1 15r 0
c hst03
c atomic density = 9.91604701E-02
m1 1001.34c 5.8873E-02
7014.34c 2.0900E-03
8016.34c 3.7314E-02
92234.34c 9.0812E-06
92235.34c 8.2436E-04
92236.34c 3.8236E-06
92238.34c 4.6930E-05
```

```
mt1 lwtr.01t
m2
6012.34c 2.6231-04
14000.34c 1.3768-03
15031.34c 3.8530-05
16000.34c 2.8282-05
24000.34c 1.6985-02
25055.34c 1.1209-03
26000.34c 5.9852-02
28000.34c 7.5400-03
42000.34c 8.9563-06
```

```
m3
1001.34c 5.6902-02
6012.34c 3.5512-02
8016.34c 1.4347-02
```

```
m4
1001.34c 5.5169-02
6012.34c 3.3967-02
7014.34c 5.5291-05
8016.34c 1.4231-02
15031.34c 3.8505-04
17000.37c 3.5606-04
```

```
c
c
c
kcode 2000 1.0 20 180
ksrc 0 0 7
print
```

付録 B 材料データ

表 B-1 から表 B-12 には、この報告書での計算に用いた燃料、構造材に関するデータを示す。

表 B-1 JCO 沈殿槽の臨界計算に用いた原子個数密度

元素	原子個数密度(atoms/barn-cm)
H	5.8512E-02*
N	2.1777E-03
O	3.7515E-02
U-234	1.4319E-06
U-235	1.7822E-04
U-238	7.5863E-04

*0.058512 と読む。以下も同様である。

表 B-2 JCO 沈殿槽の臨界計算に用いた主な構造材のデータ

材質	密度 (g/cm ³)	元素	重量比 %	原子個数密度 (atoms/barn-cm)
SUS304 ステンレス (タンク)	7.93	C	0.011	4.3736E-05
		Si	0.625	1.0627E-03
		Mn	1.33	1.1561E-03
		P	0.028	4.3170E-05
		S	0.002	2.9782E-06
		Ni	10.25	8.3403E-03
		Cr	18.265	1.6775E-02
		Fe	69.489	5.9421E-02
SUS316 ステンレス (プロペラ)	7.91	C	0.08	3.1729E-04
		Si	1.0	1.6962E-03
		Mn	2.0	1.7343E-03
		P	0.045	6.9206E-06
		S	0.03	4.4572E-05
		Ni	12.0	9.7399E-03
		Cr	17.0	1.5575E-02
		Fe	65.345	5.5740E-02
水 (298.15 K)	0.99704	H	-	6.6657E-02
		O	-	3.3328E-02

表 B-3 STACY 円筒炉心タンクでの原子個数密度(atoms/barn-cm)と H/U (測定値の密度を使用)

Run No.	1	29	33	34	46	51	54
ウラン濃度 (g/L)	310.1	290.4	270.0	253.6	241.9	233.2	225.3
硝酸濃度 (N)	2.17	2.23	2.20	2.24	2.27	2.28	2.28
密度 (g/cm ³)	1.4827	1.4572	1.4348	1.4090	1.3936	1.3848	1.3722
H	5.6953E-02	5.7214E-02	5.8085E-02	5.8033E-02	5.8187E-02	5.8528E-02	5.8561E-02
N	2.8778E-03	2.8141E-03	2.6927E-03	2.6337E-03	2.5925E-03	2.5544E-03	2.5144E-03
O	3.8027E-02	3.7849E-02	3.7826E-02	3.7528E-02	3.7413E-02	3.7422E-02	3.7278E-02
U-234	6.3833E-07	5.9778E-07	5.5579E-07	5.2203E-07	4.9795E-07	4.8004E-07	4.6378E-07
U-235	7.9213E-05	7.4181E-05	6.8970E-05	6.4780E-05	6.1792E-05	5.9569E-05	5.7551E-05
U-236	7.9114E-08	7.4088E-08	6.8884E-08	6.4700E-08	6.1715E-08	5.9495E-08	5.7480E-08
U-238	7.0556E-04	6.6074E-04	6.1432E-04	5.7701E-04	5.5039E-04	5.3059E-04	5.1262E-04
H/U	72.51	77.78	84.93	90.34	94.96	99.08	102.61

表 B-4 STACY 円筒炉心タンクでの原子個数密度(atoms/barn-cm)と H/U (密度式の密度を使用)

Run No.	1	29	33	34	46	51	54
ウラン濃度 (g/L)	310.1	290.4	270.0	253.6	241.9	233.2	225.3
硝酸濃度 (N)	2.17	2.23	2.20	2.24	2.27	2.28	2.28
密度 (g/cm ³)	1.4873	1.4634	1.4358	1.4154	1.4010	1.3898	1.3794
H	5.7262E-02	5.7627E-02	5.8150E-02	5.8463E-02	5.8682E-02	5.8863E-02	5.9042E-02
N	2.8778E-03	2.8141E-03	2.6927E-03	2.6337E-03	2.5925E-03	2.5544E-03	2.5144E-03
O	3.8182E-02	3.8055E-02	3.7858E-02	3.7743E-02	3.7660E-02	3.7590E-02	3.7519E-02
U-234	6.3833E-07	5.9778E-07	5.5579E-07	5.2203E-07	4.9795E-07	4.8004E-07	4.6378E-07
U-235	7.9213E-05	7.4181E-05	6.8970E-05	6.4780E-05	6.1792E-05	5.9569E-05	5.7551E-05
U-236	7.9114E-08	7.4088E-08	6.8884E-08	6.4700E-08	6.1715E-08	5.9495E-08	5.7480E-08
U-238	7.0556E-04	6.6074E-04	6.1432E-04	5.7701E-04	5.5039E-04	5.3059E-04	5.1262E-04
H/U	72.90	78.34	85.03	91.01	95.77	99.65	103.46

表 B-5 STACY 円筒タンクの計算に用いた主な構造材のデータ

材質	密度 (g/cm ³)	元素	重量比 %	原子個数密度 (atoms/barn-cm)
SUS304 ステンレス (タンク)	7.93	C	0.011	4.3736E-05
		Si	0.625	1.0627E-03
		Mn	1.33	1.1561E-03
		P	0.028	4.3170E-05
		S	0.002	2.9782E-06
		Ni	10.25	8.3403E-03
		Cr	18.265	1.6775E-02
		Fe	69.489	5.9421E-02
水 (298.15 K)	0.99704	H	-	6.6657E-02
		O	-	3.3328E-02

表 B-6 STACY 平板炉心タンクでの原子個数密度(atoms/barn-cm)と H/U(測定値の密度を使用)

Run No.	105	125	129	140	196
ウラン濃度 (g/L)	464.4	371.9	350.8	311.4	299.6
硝酸濃度 (N)	0.85	0.80	0.80	0.96	0.97
密度 (g/cm ³)	1.6462	1.5237	1.4957	1.4465	1.4318
H	5.5590E-02	5.7800E-02	5.8265E-02	5.8760E-02	5.9048E-02
N	2.8635E-03	2.3658E-03	2.2589E-03	2.1557E-03	2.1019E-03
O	3.8481E-02	3.7641E-02	3.7445E-02	3.7136E-02	3.7056E-02
U-234	9.5555E-07	7.6555E-07	7.2211E-07	6.4101E-07	6.1672E-07
U-235	1.1858E-04	9.4999E-05	8.9609E-05	7.9545E-05	7.6531E-05
U-236	1.1843E-07	9.4881E-08	8.9498E-08	7.9446E-08	7.6435E-08
U-238	1.0562E-03	8.4617E-04	7.9816E-04	7.0852E-04	6.8167E-04
H/U	47.28	61.36	65.57	74.50	77.81

表 B-7 STACY 平板炉心タンクでの原子個数密度(atoms/barn-cm)と H/U (密度式の密度を使用)

Run No.	105	125	129	140	196
ウラン濃度 (g/L)	464.4	371.9	350.8	311.4	299.6
硝酸濃度 (N)	0.85	0.80	0.80	0.96	0.97
密度 (g/cm ³)	1.6462	1.5270	1.4993	1.4524	1.4371
H	5.5745E-02	5.8023E-02	5.8507E-02	5.9153E-02	5.9401E-02
N	2.8635E-03	2.3658E-03	2.2589E-03	2.1557E-03	2.1019E-03
O	3.8559E-02	3.7752E-02	3.7567E-02	3.7332E-02	3.7232E-02
U-234	9.5555E-07	7.6555E-07	7.2211E-07	6.4101E-07	6.1672E-07
U-235	1.1858E-04	9.4999E-05	8.9609E-05	7.9545E-05	7.6531E-05
U-236	1.1843E-07	9.4881E-08	8.9498E-08	7.9446E-08	7.6435E-08
U-238	1.0562E-03	8.4617E-04	7.9816E-04	7.0852E-04	6.8167E-04
H/U	47.41	61.59	65.84	74.99	78.27

表 B-8 STACY 平板タンクの計算に用いた主な構造材のデータ

材質	密度 (g/cm ³)	元素	重量比 %	原子個数密度 (atoms/barn-cm)
SUS304 ステンレス (タンク)	7.93	C	0.018	7.1567E-05
		Si	0.42	7.1415E-04
		Mn	1.14	9.9095E-04
		P	0.033	5.0879E-05
		S	0.007	1.0424E-05
		Ni	10.52	8.5600E-03
		Cr	18.21	1.6725E-02
		Fe	69.652	5.9560E-02
水 (298.15 K)	0.99704	H	-	6.6657E-02
		O	-	3.3328E-02

表 B-9 高濃縮ウランベンチマークの原子個数密度(atoms/barn-cm)と H/U (測定値の密度を使用)

文献番号	HEU-SOL-THERM-002	HEU-SOL-THERM-003
ウラン濃度 (g/L)	334.77	345.33
硝酸濃度 (N)	0.521	0.534
密度 (g/cm3)	1.4636	1.4779
H	5.8742E-02	5.8477E-02
N	2.0281E-03	2.0900E-03
O	3.7013E-02	3.7116E-02
U-234	8.8035E-06	9.0812E-06
U-235	7.9915E-04	8.2436E-04
U-236	3.7067E-06	3.8236E-06
U-238	4.5495E-05	4.6930E-05
H/U	68.53	66.14

表 B-10 高濃縮ウランベンチマークの原子個数密度(atoms/barn-cm)と H/U (密度式の密度を使用)

文献番号	HEU-SOL-THERM-002	HEU-SOL-THERM-003
ウラン濃度 (g/L)	334.77	345.33
硝酸濃度 (N)	0.521	0.534
密度 (g/cm3)	1.4695	1.4838
H	5.9133E-02	5.8873E-02
N	2.0281E-03	2.0900E-03
O	3.7208E-02	3.7314E-02
U-234	8.8035E-06	9.0812E-06
U-235	7.9915E-04	8.2436E-04
U-236	3.7067E-06	3.8236E-06
U-238	4.5495E-05	4.6930E-05
H/U	68.99	66.58

表 B-11 高濃縮ウラン (HEU-SOL-THERM-002)の計算に用いた主な構造材のデータ

材質	密度 (g/cm ³)	元素	重量比 %	原子個数密度 (atoms/barn-cm)	材質	密度 (g/cm ³)	元素	重量比 %	原子個数密度 (atoms/barn-cm)
SUS304 ステンレス		C	0.066	2.6231E-04		H	0.75	1.0401E-02	
		Si	0.81	1.3768E-03	コンクリート	C	5.52	6.4237E-03	
		Mn	1.29	1.1209E-03		N	0.02	1.9958E-05	
(タンク)	7.927	P	0.025	3.8530E-05	(反射体)	2.321	O	48.49	4.2362E-02
		S	0.019	2.8282E-05			Na	0.63	3.8303E-04
		Ni	9.27	7.4500E-03			Mg	1.25	7.1885E-04
		Cr	18.5	1.6985E-02			Al	2.17	1.1241E-03
		Mo	0.018	8.9563E-06			Si	15.50	7.7139E-03
		Fe	70.02	5.9852E-02			S	0.19	8.2809E-05
		Mg	1.0	-			K	1.37	4.8976E-04
		Al	97.35	5.9469E-02			Ca	23.00	8.0213E-03
		Si	0.6	-			Ti	0.10	2.9192E-05
(タンク)	2.737	Ti	0.03	-			Fe	1.01	2.5278E-04
		Cr	0.17	-					
		Mn	0.07	-					
		Fe	0.47	-					
		Cu	0.25	-					
		Zn	0.06	-					

表 B-12 高濃縮ウラン (HEU-SOL-THERM-003) の計算に用いた主な構造材のデータ
 (タンクの材質は HEU-SOL-THERM-002 と同じ)

材質	密度 (g/cm ³)	元素	重量比 %	原子個数密度 (atoms/barn-cm)	材質	密度 (g/cm ³)	元素	重量比 %	原子個数密度 (atoms/barn-cm)	
ガラス 上部と 下部	1.286	H	7.18	5.5169E-02	ガラス	側面 (反射体)	1.186	H	8.03	5.6902E-02
		C	52.68	3.3967E-02	C			59.72	3.5512E-02	
		N	0.10	5.5291E-05	O			32.14	1.4347E-02	
		O	29.40	1.4231E-02						
		P	1.54	3.8505E-03						
		Cl	1.63	2.9192E-05						
(反射体)		Br	6.50	2.5278E-04						
		Ash	0.71	-						

付録 C 溶液密度に密度式と分析データを用いた場合の実効増倍率の比較

STACY の円筒炉心タンクでの実験と平板炉心タンクでの実験に対して、溶液燃料の密度に分析値を用いた場合と密度式を用いた場合との、実効増倍率の比較を表 C-1 と表 C-2 に示す。計算は MCNP 4B と JENDL-3.1 との組み合わせで行っている。

表 C-1 STACY 円筒タンクでの Keff の計算値(MCNP 4B +JENDL-3.1)

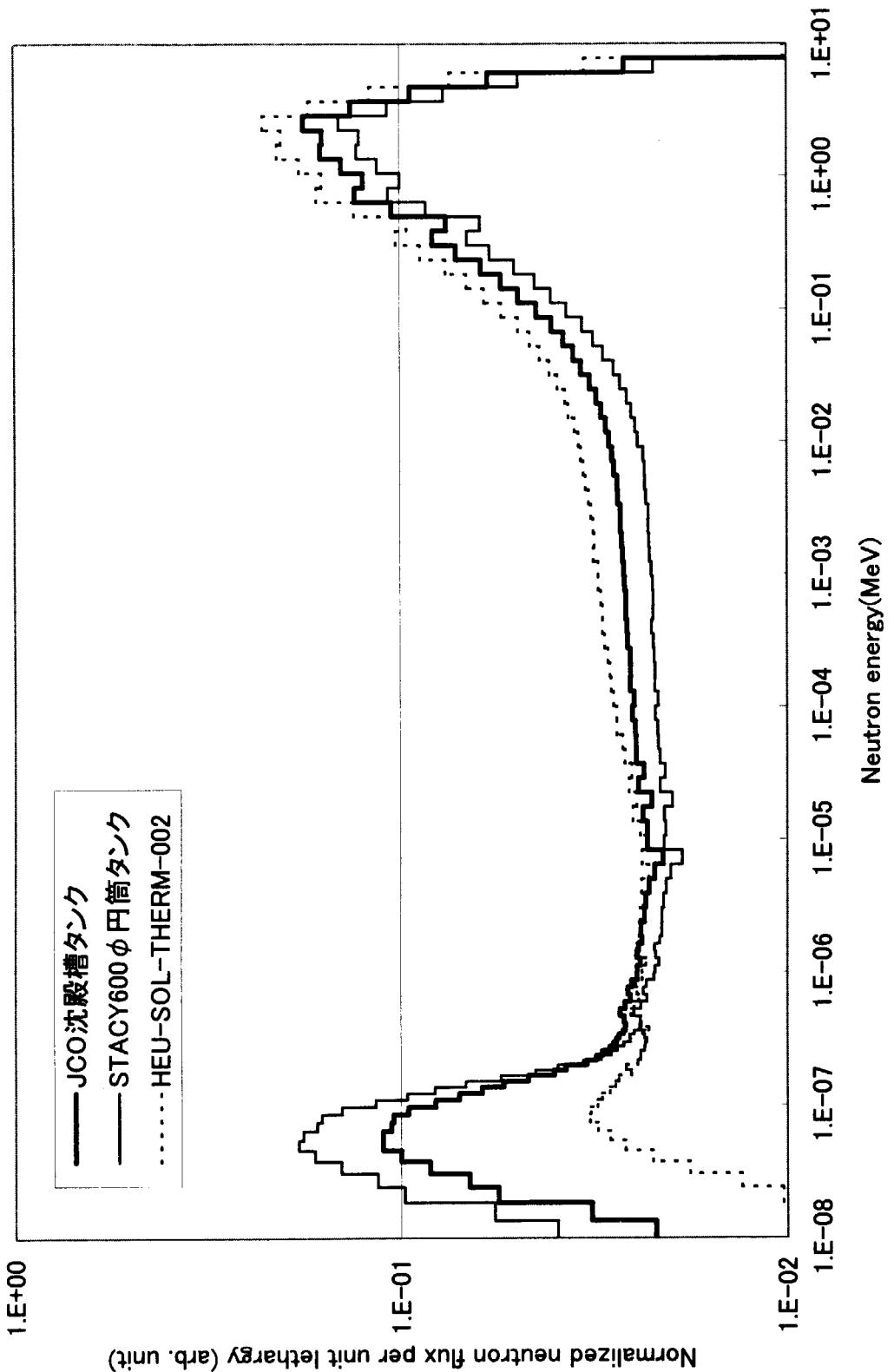
Run No.	ウラン濃度 (gU/L)	Keff	
		分析値の密度	密度式
1	310.1	0.99835 ± 0.00068	0.99938 ± 0.00051
29	290.4	0.99950 ± 0.00065	1.00160 ± 0.00043
33	270.0	0.99927 ± 0.00061	0.99911 ± 0.00044
34	253.6	1.00172 ± 0.00057	1.00215 ± 0.00042
46	241.9	1.00160 ± 0.00052	1.00160 ± 0.00041
51	233.2	0.99962 ± 0.00058	0.99997 ± 0.00039
54	225.3	1.00207 ± 0.00054	1.00039 ± 0.00037

表 C-2 STACY 平板タンクでの Keff の計算値(MCNP 4B +JENDL-3.1)

Run No.	ウラン濃度 (gU/L)	Keff	
		分析値の密度	密度式
105	464.2	1.00163 ± 0.00076	1.00301 ± 0.00051
125	371.9	1.00228 ± 0.00076	1.00207 ± 0.00049
129	350.8	1.00074 ± 0.00066	1.00189 ± 0.00047
140	311.4	1.00079 ± 0.00070	1.00042 ± 0.00047
196	299.6	0.99945 ± 0.00067	1.00175 ± 0.00046

付録 D 中性子スペクトル

本報告書内で計算対象として用いた JCO 沈殿槽タンク、STACY600 φ円筒タンク、及び ICSBEP ハンドブックの HEU-SOL-THERM-002 の硝酸ウラニル水溶液内平均中性子エネルギー・スペクトルについて、MCNP 4 B を用いて計算を行なった。核データライブラリーは JENDL3.1 を用いた。



図D-1 種々の溶液系炉心体系における中性子エネルギースペクトル

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, l
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ヘキサ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10¹⁰ St(ストークス)(cm²/s)

力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-1}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-2}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸氣表)
		1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889					
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}			
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}			
	4.48605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}			
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-1}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}			
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}			
	1.60218×10^{16}	1.63377×10^{20}	4.45050×10^{26}	3.82743×10^{20}	1.51857×10^{22}	1.18171×10^{19}	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270×10^{-6}		1	100
	3.7×10^{16}	1	0.01	1	

照射線量	C/kg		R
	1	2.58×10^{-1}	
	1	1	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

